

## ФРАКЦИОНИРОВАНИЕ ДЕЙТЕРИЯ В ОБЛАСТЯХ МАЛОМАССИВНОГО ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ

А. Ф. Пуанова, И. В. Петрашкевич

*Уральский федеральный университет*

В этой работе мы исследуем, как меняется доля дейтерия в зависимости от физических условий в холодных ядрах на примере молекулярных облаков Тельца, Персея и Змееносца. Результаты показывают, что доля дейтерия в холодных ядрах в среднем разная в разных областях звездообразования. В наиболее плотной и турбулентной из рассматриваемых областей L1688 в Змееносце доля дейтерия в соединениях в два раза выше, чем L1495 в Тельце и в B5 в Персее. В L1495 и L1688 доли дейтерия в центральных частях и оболочке ядер отличаются примерно в 10 раз, тогда как в B5 только в 2–3 раза.

## DEUTERIUM FRACTIONATION IN LOW-MASS STAR-FORMING REGIONS

A. F. Puanova, I. V. Petrashkevich

*Ural Federal University*

In this work, we study how deuterium fraction changes depending on the physical conditions in cold cores embedded in the molecular clouds of Taurus, Perseus and Ophiuchus. The results show that the deuterium fraction in cold cores varies in different star-forming regions. In the densest and most turbulent of the studied regions, L1688 in Ophiuchus, the deuterium fraction is two times higher than that of L1495 in Taurus and B5 in Perseus. In L1495 and L1688, the deuterium fraction in the central parts of the cores and in their envelopes differ by a factor of 10, while in B5 only by a factor of 2–3.

## Введение

Согласно современным представлениям образование звезд малых масс начинается в так называемых дозвездных ядрах — плотных ( $> 10^5 \text{ см}^{-3}$ ) холодных ( $\sim 10 \text{ K}$ ) сгустках внутри молекулярных облаков (см., например, [1]). Дозвездные ядра особенно ярко характеризуются двумя явлениями — «вымерзанием» (физической адсорбцией) молекул из газа на пыль и фракционированием изотопов химических элементов в молекулах. При температурах, характерных для дозвездных ядер ( $\sim 10 \text{ K}$ ), эффективно физисорбируют все атомы и молекулы, за исключением молекулярного водорода и гелия. В частности, эффективно вымерзает молекула CO, образуя хорошо видимые в наблюдениях области с пониженным содержанием CO в газе в центральных областях дозвездных ядер. Фракционирование изотопов при химических реакциях в рамках физической химии объясняется особенностями термодинамики и кинетики реакций. Оно наиболее эффективно в случае водорода и дейтерия, поскольку отношение масс протона и дейтерия составляет  $1 : 2$  — значение, недостижимое для стабильных изотопов других химических элементов. Эффективное фракционирование дейтерия приводит к тому, что хотя число атомов дейтерия по отношению к числу атомов водорода ( $D/H$ ) во Вселенной составляет около  $1.5 \times 10^{-5}$  [2], в холодных ( $\sim 10 \text{ K}$ ) дозвездных ядрах отношения содержания дейтерированных и содержащих основной изотоп водорода молекул (например, отношение лучевых концентраций  $N(N_2D^+)/N(N_2H^+)$ ) может достигать десятков процентов (см., например, [3]).

Дейтерий заменяет собой водород в результате следующей цепочки реакций. Реакция  $\text{H}_3^+ + \text{HD} \rightleftharpoons \text{H}_2\text{D}^+ + \text{H}_2 + 230 \text{ К}$  протекает только слева направо в холодных ядрах и тем самым увеличивает количество иона  $\text{H}_2\text{D}^+$  [4], далее распространяющего дейтерий в реакции с любой двухатомной молекулой A:  $\text{H}_2\text{D}^+ + \text{A} \rightarrow \text{AD}^+ + \text{H}_2$  [5]. Процессы вымерзания CO и фракционирования дейтерия тесно связаны: CO, вторая по распространенности в молекулярных облаках, эффективно разрушает ион  $\text{H}_3^+$ , необходимый для распространения дейтерия в водородсодержащих соединениях. С ростом плотности среды в холодном ядре вымерзание усиливается, а доля дейтерия в молекулах растет. Так высокая доля дейтерия становится одним из индикаторов дозвездной фазы, важной для изучения начальных условий образования звезд солнечного типа.

## Объекты исследования

Ближайшие к нам области образования маломассивных звезд, молекулярные облака так называемого пояса Гулда, наиболее удобные для наблюдений, характеризуются различными темпами звездообразования. Для лучшего понимания этого процесса необходимо исследовать и учитывать локальные физические условия в облаке, т. е. окружение дозвездных ядер. Для нашего исследования мы выбрали 23 холодных ядра в трех областях звездообразования — в молекулярных облаках Тельца, Персея и Змееносца. Физические условия в трех исследуемых областях звездообразования очень разные. Область L1495 в Тельце наиболее спокойная, с минимальным, дозвуковым, уровнем турбулентности [6], низкой температурой газа (8–10 К [7]) и пыли (12–15 К [8]) и относительно низкой плотностью газа ( $N(\text{H}_2) \sim 5 \times 10^{21} \text{ см}^{-2}$ ). Область B5 в Персее погружена в чуть более турбулентный газ, однако это первая область, у которой был обнаружен довольно резкий переход от сверхзвуковой к дозвуковой турбулентности [9]. B5 также характеризуется низкими температурами газа и пыли (10–13 К [9]) и относительно невысокой плотностью газа ( $N(\text{H}_2) \sim 10^{22} \text{ см}^{-2}$ ). Среди рассматриваемых областей L1688 в Змееносце наиболее турбулентная: тогда как в дозвездных ядрах турбулентность остается дозвуковой, в окружающем газе она превышает две скорости звука; температура газа (9–17 К) и пыли (10–20 К) здесь выше и имеет больший разброс внутри самой области; среда здесь также плотнее ( $N(\text{H}_2) \sim 10^{23} \text{ см}^{-2}$ ) [10, 11].

## Наблюдательные данные

Химическое фракционирование в холодных ядрах позволяет использовать различные молекулы и ионы (а также их энергетические переходы разных уровней) в качестве трассеров разных частей холодных ядер, а также изучать различные физические свойства среды. Так, углеродсодержащие молекулы (как CO) и генетически связанные с ними ионы (как  $\text{HCO}^+$ ) рано образуются в молекулярном облаке и присутствуют в газе при довольно малых плотностях ( $\sim 10^3 \text{ см}^{-3}$ ), а в плотном газе их содержание снижается из-за вымерзания CO. А азотсодержащие соединения (как  $\text{NH}_3$  или  $\text{N}_2\text{H}^+$ ) становятся видны при больших плотностях (поскольку образуются в уже прореволюционировавшем, а значит, более плотном газе) и остаются в газе вплоть до  $n > 10^6 \text{ см}^{-3}$ .

Чтобы наиболее полно изучить фракционирование дейтерия в холодных ядрах, мы пронаблюдали выбранные источники в линиях трех пар молекул и ионов:  $\text{N}_2\text{H}^+$  и  $\text{N}_2\text{D}^+$ ,  $\text{H}^{13}\text{CO}^+$  и  $\text{DCO}^+$ ,  $p\text{-NH}_2\text{D}$  и  $p\text{-NH}_3$ . Все наблюдения выполнены нами в 2014–2018 гг. на телескопе IRAM 30m, за исключением наблюдений  $p\text{-NH}_3$ , выполненных на телескопе GBT в составе обзора GAS [11].

В этой работе будем считать, что  $\text{H}^{13}\text{CO}^+$  и  $\text{DCO}^+$  являются трассерами оболочки холодных ядер, а  $\text{N}_2\text{H}^+$ ,  $\text{N}_2\text{D}^+$ ,  $p\text{-NH}_2\text{D}$  и  $p\text{-NH}_3$  — трассерами центральных плотных частей.

Для измерения температуры пыли и лучевой концентрации молекулярного водорода мы использовали данные непрерывного излучения пыли с телескопа имени Гершеля в полосах 250, 350 и 500 мкм [8].

## Результаты

Долю дейтерия считают как отношение лучевых концентраций дейтерированного и водородсодержащего изотополога одного и того же соединения, например,  $R_D = N(\text{N}_2\text{D}^+)/N(\text{N}_2\text{H}^+)$ . Расчет лучевых концентраций  $\text{N}_2\text{H}^+$ ,  $\text{N}_2\text{D}^+$ ,  $\text{HCO}^+$ ,  $\text{DCO}^+$ ,  $p\text{-NH}_3$  и  $p\text{-NH}_2\text{D}$  выполнялся в предположении локального термодинамического равновесия (ЛТР). Для расчета лучевой концентрации  $\text{HCO}^+$ , обладающего большим содержанием в газе, мы использовали наблюдательные данные его более редкого изотополога  $\text{H}^{13}\text{CO}^+$ , линии которого обладают небольшой оптической толщиной и позволяют исследовать весь газ на луче зрения. Фракционированием изотопов углерода в этом случае пренебрегают, и оно несущественно (нерегистрируемо) в пределах одного холодного ядра. Все выбранные для исследования линии обладают сложной сверхтонкой структурой, благодаря этому в предположении ЛТР можно достаточно надежно измерить их оптическую толщину и соответственно достаточно точно измерить лучевую концентрацию соединений. Обработка данных проводилась с помощью программных пакетов GILDAS, анализ спектров — с помощью пакета Ryspeckit [12]. Для корректности расчета и сравнения все полученные спектральные карты холодных ядер приводились к одинаковому (худшему) угловому разрешению, таким образом, угловое разрешение карт составило  $\sim 32''$ .

Доля дейтерия в соединениях в центральной части плотного ядра выше, чем во внешних частях. Это видно как из сравнения доли дейтерия в трассерах более плотного газа в центре ( $R_D(\text{N}_2\text{H}^+, \text{NH}_3) \sim 0.2\text{--}0.5$ ) и менее плотного газа в оболочке ( $R_D(\text{HCO}^+) \sim 0.05$ ), так и из зависимости доли дейтерия от расстояния до центра ядра. Уменьшение доли дейтерия с относительным расстоянием (нормированным на размер) до центра ядра заметно для ионов,  $\text{N}_2\text{H}^+$  и  $\text{DCO}^+$ , тогда как для нейтрального аммиака эта связь практически не прослеживается. Это может быть связано с различием химии ионов и молекул.

Область В5 представляет собой небольшое волокно с погруженным инфракрасным источником и несколькими плотными ядрами. Протозвезда разогрела окружающий газ, и доля дейтерия  $R_D(\text{N}_2\text{H}^+)$  вблизи нее мала. С расстоянием от погруженного источника  $R_D(\text{N}_2\text{H}^+)$  сначала увеличивается, а затем снова уменьшается уже в менее плотном газе. Результаты показывают, что доля дейтерия в дозвездных ядрах в среднем разная в разных областях звездообразования: в L1495 в Тельце  $R_D \sim 0.2$  и 0.03 в центральных частях и в оболочке, тогда как в В5 в Персее  $R_D \sim 0.25$  и 0.09, а в L1688 в Змееносце  $R_D \sim 0.5$  и 0.05 в центральных частях и в оболочке соответственно. Область L1688 более плотная и турбулентная, чем L1495 и В5, с более высоким темпом звездообразования, за счет внешнего давления облака на ядра они становятся плотнее и доля дейтерия растет. В L1495 и L1688 доля дейтерия в центральных частях ( $R_D(\text{N}_2\text{H}^+)$ ) и оболочке ( $R_D(\text{HCO}^+)$ ) отличается примерно в 10 раз. Однако в В5 различие в доле дейтерия между плотными частями, видимыми в  $\text{N}_2\text{H}^+$ , и менее плотным газом в  $\text{HCO}^+$  существенно меньше, только в 2—3 раза. Результаты этой работы частично опубликованы в [13], часть их (об L1688) более подробно обсуждается в работе И. В. Петрашкевича и А. Ф. Пунановой в этом же сборнике трудов.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект 19-72-00064.

## Библиографические ссылки

- [1] *Ward-Thompson D., Motte F., Andre P.* The initial conditions of isolated star formation - III. Millimetre continuum mapping of pre-stellar cores // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 1999. — Vol. 305. — P. 143–150.
- [2] *Linsky J. L., Draine B. T., Moos H. W. et al.* What Is the Total Deuterium Abundance in the Local Galactic Disk? // *Astrophys. J.* — 2006. — Vol. 647. — P. 1106–1124. [astro-ph/0608308](#).
- [3] *Crapsi A., Caselli P., Walmsley C. M. et al.* Probing the Evolutionary Status of Starless Cores through  $\text{N}_2\text{H}^+$  and  $\text{N}_2\text{D}^+$  Observations // *Astrophys. J.* — 2005. — Vol. 619. — P. 379–406. [astro-ph/0409529](#).
- [4] *Millar T. J., Bennett A., Herbst E.* Deuterium fractionation in dense interstellar clouds // *Astrophys. J.* — 1989. — Vol. 340. — P. 906–920.
- [5] *Dalgarno A., Lepp S.* Deuterium fractionation mechanisms in interstellar clouds // *Astrophys. J. Lett.* — 1984. — Vol. 287. — P. L47–L50.
- [6] *Punanova A., Caselli P., Pineda J. E. et al.* Kinematics of dense gas in the L1495 filament // *Astron. Astrophys.* — 2018. — Vol. 617. — P. A27. [1806.03354](#).
- [7] *Seo Y. M., Shirley Y. L., Goldsmith P. et al.* An Ammonia Spectral Map of the L1495-B218 Filaments in the Taurus Molecular Cloud. I. Physical Properties of Filaments and Dense Cores // *Astrophys. J.* — 2015. — Vol. 805. — P. 185. [1503.05179](#).
- [8] *Palmeirim P., André P., Kirk J. et al.* Herschel view of the Taurus B211/3 filament and striations: evidence of filamentary growth? // *Astron. Astrophys.* — 2013. — Vol. 550. — P. A38. [1211.6360](#).
- [9] *Pineda J. E., Goodman A. A., Arce H. G. et al.* Direct Observation of a Sharp Transition to Coherence in Dense Cores // *Astrophys. J. Lett.* — 2010. — Vol. 712. — P. L116–L121. [1002.2946](#).
- [10] *Punanova A., Caselli P., Pon A. et al.* Deuterium fractionation in the Ophiuchus molecular cloud\* // *Astron. Astrophys.* — 2016. — Vol. 587. — P. A118. [1512.02986](#).
- [11] *Friesen R. K., Pineda J. E., co-PIs et al.* The Green Bank Ammonia Survey: First Results of  $\text{NH}_3$  Mapping of the Gould Belt // *Astrophys. J.* — 2017. — Vol. 843. — P. 63. [1704.06318](#).
- [12] *Ginsburg A., Mirocha J.* PySpecKit: Python Spectroscopic Toolkit. — *Astrophysics Source Code Library*. — 2011. [1109.001](#).
- [13] *Petrashkevich I. V., Punanova A. F., Caselli P. et al.* Deuterium Fractionation in the Oph-H-MM1 Dense Core of the L1688 Low Mass Star-Forming Region // *Astronomy Reports*. — 2020. — Vol. 64, № 8. — P. 637–640.